



В. Я. Тойбич  
С. В. Тойбич

# **Разработка электромагнита постоянного тока в среде Pro|ENGINEER**

Екатеринбург  
2012

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет»

Кафедра автоматизации производственных процессов

В. Я. Тойбич

С. В. Тойбич

# **Разработка электромагнита постоянного тока в среде Pro|ENGINEER**

Методические указания для проведения практических  
и лабораторных работ по САПР для специальности 220301  
очной и заочной форм обучения направлений  
220301 «Автоматизация технологических процессов и производств»,  
220200 «Автоматизация и управление»

Екатеринбург  
2012

Рассмотрены и рекомендованы к изданию методической комиссией  
лесоинженерного факультета УГЛТУ  
Протокол № 1 8 сентября 2010 г.

Рецензент: доцент канд. техн. наук С. П. Санников

Редактор Е. Л. Михайлова  
Оператор компьютерной верстки Т. В. Упорова

---

Подписано в печать 15.05.12	Печ. л. 1,86	Формат 60×84 1/16
Плоская печать	Заказ №	Тираж 50 экз.
Поз. 3		Цена 10 руб. 16 коп.

---

Редакционно-издательский отдел УГЛТУ  
Отдел оперативной полиграфии

## Введение

Современный рынок программных продуктов предлагает огромный выбор средств автоматизированного проектирования (САПР) различных объектов машиностроения, разработки электрических и электро-монтажных схем, а также электронных схем от транзисторов до микро-контроллеров. Объединяет все эти программы центральная идея автоматизации

инженерного труда, причем не только в плане создания тех или иных схем или чертежей, но и описания всех сопутствующих периодов существования этого проекта, называемого жизненным циклом. Отличаются программы (САПР) друг от друга своими возможностями в плане обеспечения каждому элементу, сборке и изделию в целом некоторого набора параметров, сохраняемых и корректируемых в течение всех этапов проектирования.

В данной работе рассматривается процесс создания модели электро-магнита в среде Pro|ENGINEER семейства Wildfire.

Программа Pro|ENGINEER имеет в своем составе:

- a) средства машиностроительного проектирования CAD-MCAD (Mechanical Computer Aided Design);
- b) средства инженерного анализа CAE (Computer Aided Engineering);
- c) средства подготовки автоматизированного производства CAM (Computer Aided Manufacturing);
- d) средства планирования технологических процессов CAPP (Computer Aided Process Planning).

В свою очередь, средства инженерного анализа позволяют производить:

- a) прочностные, тепловые и модальные расчеты;
- b) кинематический и динамический анализы;
- c) оптимизацию и анализ допусков;
- d) симуляцию процессов сварки, литья и обработки давлением;
- e) чертежи и спецификации и многое другое.

Таким образом, САПР позволяет организовать совместную работу конструктора, расчетчика и технолога в едином пространстве проекта.

САПР Pro|ENGINEER допускает проведение проектирования двумя принципиально разными методами, называемыми Top-Down и Down-Top, т.е. сверху вниз и снизу вверх. Это означает, что, создав прообраз будущего изделия в общем (Top) исходя из предпочтительного дизайна, ограничения размеров или формы, а также каких-либо других соображений разработчика, можно произвести наполнение проекта конкретными деталями или сборками на нижнем уровне (Down). Соответственно проектирование снизу вверх позволяет создавать большие сборки из имеющихся в биб-

лиотеке или уже разработанных конструктором элементов, деталей и подборок.

В данной работе будем использовать метод сверху вниз, так как он позволит нам продемонстрировать возможность наполнения каркасной модели (скелетона) конкретными деталями изделия, так сказать, «в теле».

Для успешного освоения материала нужна некоторая начальная подготовка, которая включает изучение различных простых режимов и процедур создания элементов проекта. Необходимо ознакомиться с инструментами, используемыми при эскизировании на плоскости и в трехмерных твердотельных деталях, освоить технику создания и использования различных базовых элементов, фичеров и модулей, иметь навыки работы в режиме сборки. Для этих целей подходит книга, выпущенная в 2008 г. издательством «Поматур» : «Wildfire 3.0. Первые шаги», написанная А. В. Булановым – представителем компании РТС (Parametric Technology Corporation – разработчик системы) в соавторстве с О. Шевченко и С. Гусаровым – сотрудниками компании ИРИСОФТ (СПб).

Конечно, необходимо знать и объект проектирования – электромагнит, как электромеханическое изделие, его назначение, устройство, принцип действия и основные электрические параметры, характеризующие его в электрической цепи.

Разработку электромагнита будем вести в среде Wildfire 5 – последней версии программы.

## Электромагниты

Электромагнит представляет собой электромагнитный механизм, в котором электрическая энергия преобразуется в механическую. Таким образом, электромагнит классифицируется как исполнительный элемент автоматики и применяется, когда необходимо совершить механическое перемещение на некоторое расстояние, т.е. произвести определенную работу. В электромагните всего одна движущаяся часть – якорь, и это несомненное преимущество перед другими средствами электромеханического перемещения, например, электродвигателем. Но и возможности электромагнита ограничены, так как он может совершить рабочий ход только от начального

до конечного значения без промежуточных остановок. Правда, в настоящее время разработаны электромагниты, имеющие несколько промежуточных точек останова, но конструкции их, конечно, сложнее. Электромагниты хорошо подходят для применения в приводах всевозможных клапанов, защелок, золотников гидро- и пневмооборудования, контакторов, пускателей и т. д.

Электромагниты по роду используемого тока делятся на электромагниты постоянного тока (нейтральные и поляризованные) и переменного тока (однофазные и многофазные). Ещё они делятся по величине хода якоря на коротко-, средне- и длинноходовые. Одним из основных показателей электромагнита является величина тягового усилия, которое может обеспечить электромагнитная система при заданном ходе якоря.

Как компонент автоматической системы это инерционное звено, причем инерционность его обусловлена как механическим моментом инерции, так и электромагнитной инерционностью, вызванной наличием индуктивности обмотки. Динамические параметры электромагнитов примерно такие же, как и у других электромеханических устройств, но в то же время, существуют электромагниты, быстродействию которых придается первоочередное значение, поэтому они могут содержать не одну, а две обмотки с разной величиной индуктивности, выполняющие функции пусковой и удерживающей.

По конструктивному исполнению электромагниты делятся на втяжные (якорь втягивается внутрь катушки), поворотные (якорь поворачивается в магнитной системе на некоторый угол), клапанные (якорь также поворачивается вокруг оси подобно клапанному механизму двигателя внутреннего сгорания).

Наиболее эффективными по соотношению габариты – усилие являются электромагниты постоянного тока броневого конструктива. Обмотка, как броней, защищена корпусом, который служит одновременно и магнитопроводом, поэтому площадь сечения корпуса должна отвечать не только меха-

ническим требованиям, но и обеспечивать прохождение магнитного поля с малым сопротивлением.

Данное методическое руководство не ставит целью охватить все виды и конструкции существующих электромагнитов, а лишь показывает путь, приводящий к автоматизации процесса проектирования. В качестве объекта проектирования выбран электромагнит броневого типа, но при соответствующей корректировке можно проводить расчеты и других типов и конструкций электромагнитов.

## Устройство броневого электромагнита

На рис. 1 приведен разрез электромагнита броневого типа. В целях облегчения понимания сути проектирования его конструкция максимально упрощена и доведена всего до шести деталей: 1 – якорь, 2 – шпуля (каркас обмотки), 3 – магнитопровод (он же корпус), 4 – стопор, 5 – задний фланец, 6 – передний фланец. Передний и задний фланцы крепятся к корпусу винтами, стопор с задним фланцем также соединен при помощи центрального винта (для упрощения винты не показаны). Так как якорь должен свободно перемещаться в переднем фланце без заеданий и затирааний, необходимо обеспечить между ними зазор, но это одновременно приводит и к увеличению сопротивления магнитному потоку, создаваемому обмоткой. Уменьшить сопротивление можно при помощи «воротника» – некоторого расширения зоны передачи магнитного потока, что, впрочем, применяется довольно редко, так как требует усложнения конструкции переднего фланца. Корпус электромагнита выполняет две задачи – предохраняет обмотку от механических внешних воздействий и одновременно является проводником магнитного поля, создаваемого обмоткой. По конструктивному исполнению корпус может быть круглой или прямоугольной формы. Иногда задний или передний фланец выполняется заодно с корпусом, что, конечно, исключает один паразитный зазор, но также усложняет изготовление такого корпуса. Также стопор может быть выполнен заодно с задним фланцем, что также исключает ещё один паразитный зазор. Таким образом, число деталей электромагнита может быть доведено до четырёх.

Якорь и стопор выполнены конусообразными для увеличения эффективности потокоцепления. Внешняя форма корпуса прямоугольная, что облегчает его крепление к другим элементам. На каркас наматывается изолированный провод (обычно медный), образуя обмотку электромагнита. Дополнительно обмотка сверху защищается изоляцией (как правило, это несколько слоев диэлектрической ленты или специальной бумаги). Выводы обмотки пропускают в отверстие или паз в корпусе. Для обеспечения минимального зазора между движущимся якорем и неподвижным передним фланцем, якорь полируют и помещают в гильзу из немагнитного материала (меди или латуни). Движение якоря иногда балансируется противовеса-

ми, а корпус снабжается элементами их крепления (серьги, кронштейны, упоры). Якорь для соединения с внешними элементами имеет паз и отверстие (иногда осевое отверстие с резьбой).

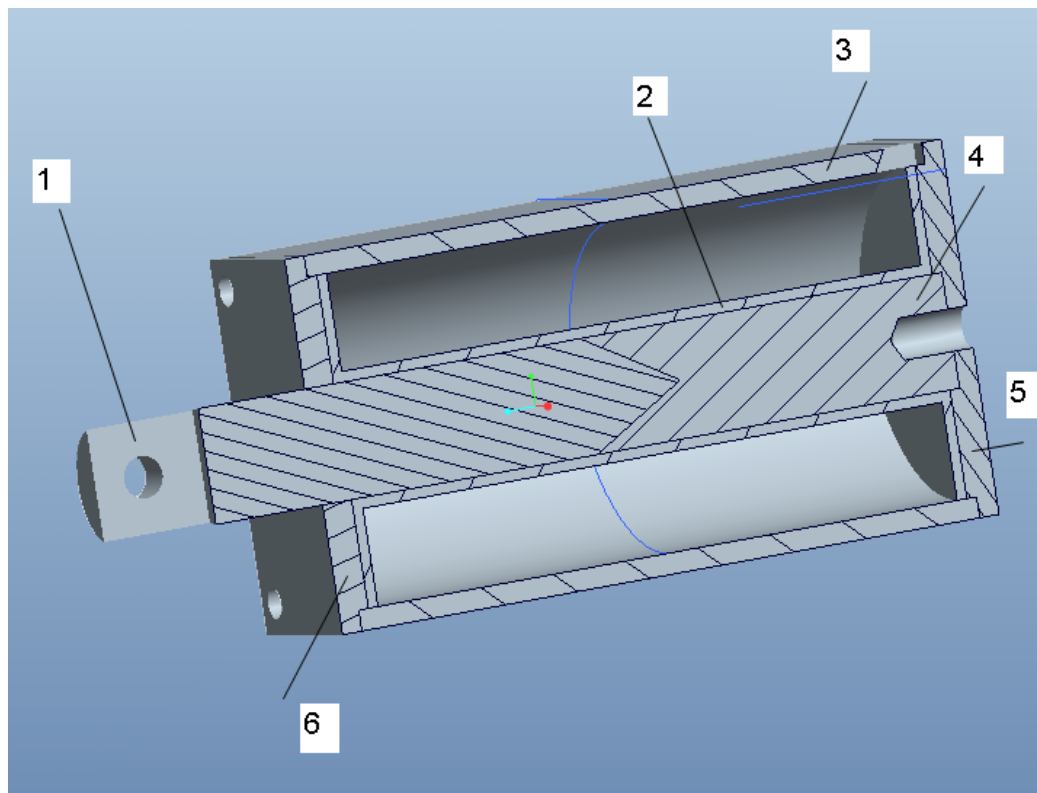


Рис. 1. Конструкция электромагнита броневое типа в разрезе:  
1 – якорь, 2 – каркас обмотки, 3 – магнитопровод (корпус),  
4 – стопор, 5 – задний фланец, 6 – передний фланец



## Параметры электромагнита и константы

Как известно, тяговая характеристика электромагнита постоянного тока весьма нелинейна, так как это часть параболы, описывающая изменение электромагнитного усилия при перемещении якоря от начального до конечного положения. Естественно, что в любой точке график зависимости тягового усилия от величины хода якоря должен располагаться выше графика механического противодействия перемещению.

Обычно **входными** параметрами, которым должен соответствовать проектируемый электромагнит, являются:

$P$  – тяговое усилие при начальном положении якоря, Н;

$X$  – максимальный ход якоря, м;

$U$  – напряжение питания, В;

$PВ$  – относительная продолжительность включения, %.

**Выходными** параметрами будем считать:

$d_j$  – диаметр якоря, м;

$d_{max}$  – максимальный диаметр катушки, м;

$L_k$  – длину катушки, м.

Перечисленные выходные параметры являются главными, определяющими другие, зависимые от главных или определяемые из конструктивных или иных соображений. Соответственно, уменьшается и количество элементов каркасной модели электромагнита.

Конечно, выходных параметров больше, чем три приведенные, и нам их придется найти, но, в нашем случае, они будут иметь вспомогательную и справочную функции, лишь помогая определить три основные. К вспомогательным и справочным параметрам отнесем:

$S_j$  – площадь сечения якоря,  $m^2$ ;

$F$  – магнитодвижущую силу катушки, А;

$D_m$  – диаметр провода обмотки, мм;

$D_{cp}$  – средний диаметр витка обмотки, м;

$I$  – установившийся ток катушки, А;

$R$  – сопротивление катушки, Ом;

$W$  – число витков катушки;

$N$  – мощность в обмотке, Вт;

$Q_k$  – площадь окна под обмотку,  $m^2$ ;

$H_k$  – высоту намотки катушки, м;

$B$  – индукцию в рабочем зазоре, Тл;

$T$  – постоянную времени нагрева катушки, с;

$G$  – вес меди, кг.

Константы:

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;

$\rho = 1/57$  Ом·мм<sup>2</sup>/м – удельное сопротивление меди;

$k_z = 0,55$  – коэффициент заполнения по меди;

$\alpha = \pi/3$  – угол конуса якоря;

$c = 390$  Дж/(кг·К) – теплоемкость меди;

$\gamma = 8700$  кг/м<sup>3</sup> – плотность меди;

$k_t = 20$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) – коэффициент теплоотдачи поверхности катушки.

## Расчетные соотношения

Ниже приводятся формулы и соотношения для расчета электромагнита с некоторыми упрощениями и допущениями. Для проведения уточненного расчета необходимо увеличить число входных параметров и ввести дополнительные данные, например, характеристики магнитных свойств материала якоря, фланцев и корпуса, разместить список стандартных диаметров проводов для намотки катушки, подобрать значение коэффициента заполнения по меди в зависимости от диаметра провода и т.д.

1. Приблизительный диаметр якоря можно определить из выражения

$$d := \sqrt{\frac{P}{\pi 10^5 B^2}}$$

В этом выражении неизвестно значение В-индукции в рабочем зазоре. Примем  $B = 0,5$  Тл. Полученный диаметр округлим до ближайшего целого значения  $d_j$  и определим уточненное значение его сечения:

$$S_j := \pi \frac{(d_j)^2 \cdot 10^{-6}}{4}$$

2. Максимальный диаметр катушки (он же внутренний диаметр магнитопровода)

$$d_{\max} := 1000 \cdot \sqrt{P} \cdot 10^{-2}$$

3. Магнитодвижущая сила катушки

$$F_k := \sqrt{2P \frac{x^2}{\mu \cdot S_j} \cos(\alpha) \cos(\alpha)}$$

4. Диаметр среднего витка катушки

$$d_{cp} := \frac{(d_j + d_{max})}{2}$$

5. Диаметр провода катушки

$$d_m := \sqrt{4 \cdot 10^{-3} \rho d_{cp} \frac{F_k}{U}}$$

6. Установившийся ток в катушке при длительном включении

$$I := 0.75 \pi (d_m)^2$$

7. Сопротивление катушки постоянному току

$$R_k := \frac{U}{I}$$

8. Число витков

$$w := \frac{F_k \cdot R_k}{U}$$

9. Мощность, выделяемая в катушке

$$N_k := I \cdot U$$

10. Площадь окна под катушку

$$Q_k := \frac{w \pi (d_m)^2}{4K_z}$$

11. Высота намотки катушки

$$H_k := d_{cp} - d_j$$

12. Длина намотки катушки

$$L_k := \frac{Q_k}{H_k}$$

13. Масса провода катушки

$$m_k := \frac{(d_m)^2 \cdot w \cdot d_{cp} \cdot \pi^2 \cdot 10^{-6} \cdot \gamma}{4}$$

14. Постоянная времени нагрева катушки из медного провода

$$T_m := \frac{(d_m)^2 \cdot w \cdot d_{cp}}{30 Q_k}$$

Эти расчетные соотношения в дальнейшем мы занесем в программу Matcad, в которой и будут выполняться вычисления, после чего из Matcad полученные данные переправятся обратно в Pro|ENGINEER. На основании полученных результатов вычислений Pro|ENGINEER самостоятельно перестроит исходную модель, закрепив новые размерные параметры.

Таким образом, на размеры будущего электромагнита окажут влияние расчетные электрические соотношения. Программа Matcad интегрирована с программой Pro|ENGINEER, и они прекрасно понимают и дополняют друг друга.

Собственно автоматизация проектирования и заключается в существенном сокращении времени на изменение и корректировку модели в процессе всего жизненного цикла изделия.

## Скелетон модели

Так как все детали электромагнита сопрягаются и должны изменяться с изменением начальных условий, проектирование можно вести методом создания каркасной модели (SKELETONS). Идея каркасного проектирования подразумевает сопряжение деталей, так называемую общую

геометрию, связывающую в единую скелетную модель все элементы сборки. Взаимосвязь элементов каркаса описывается логическими и математическими связями или параметрами.

Для создания скелета были выполнены два эскиза во взаимно перпендикулярных плоскостях ASM.FRONT и ASM.RIGHT, в которых элементы связываются между собой обязательствами уравнений.

Зададим новую папку под именем «эл.магн.» и, открыв новый сборочный файл, переименуем его в «el\_magn» (рис. 2).

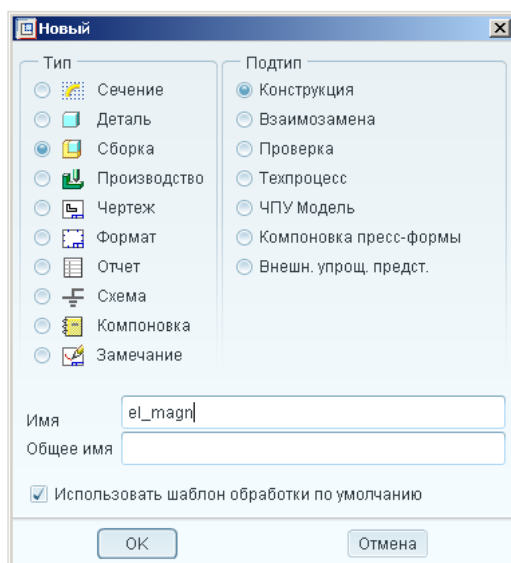


Рис. 2. Установка сборочного файла

Создадим компонент в режиме сборки в виде каркасной модели (рис. 3).

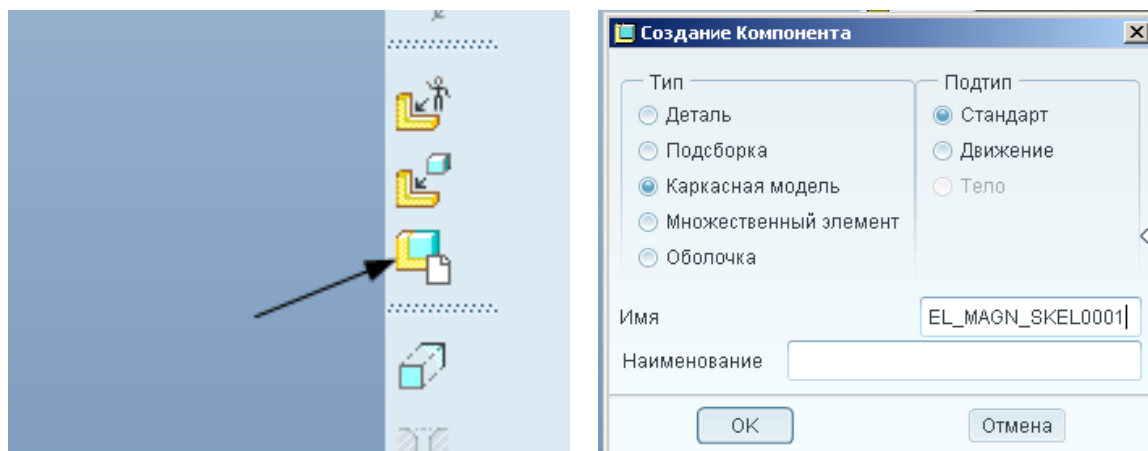


Рис. 3. Организация каркасной конструкции

В опциях создания выберем «пустой», ОК, что приводит к появлению записи строки скелетона в дереве модели. Активируем EL\_MAGN\_SKELE0001.PRT и приступим к созданию скелетона (рис. 4).

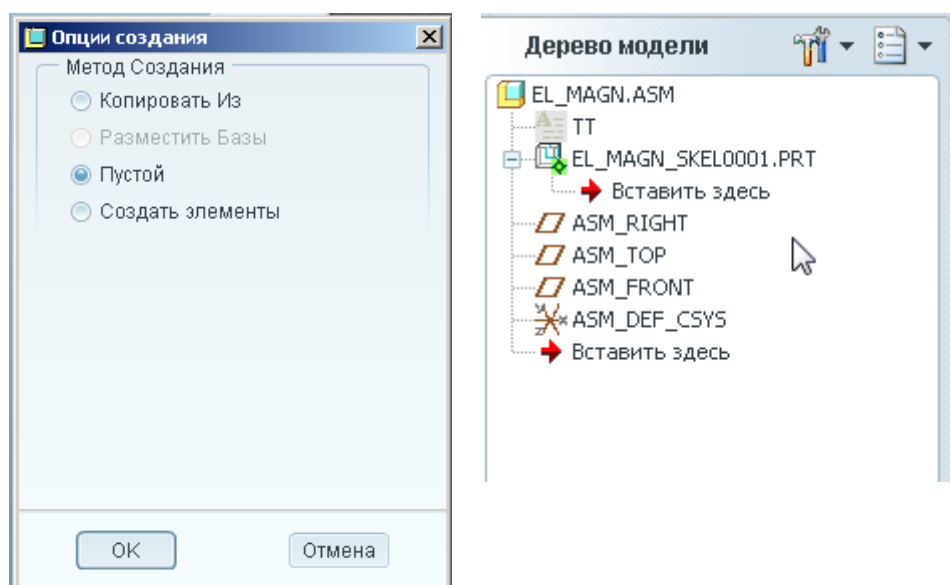



Рис. 4. Корень дерева скелетона

Создадим первый эскиз скелетона в плоскости  ASM\_FRONT и свяжем его размеры уравнениями в символическом виде (рис. 5).

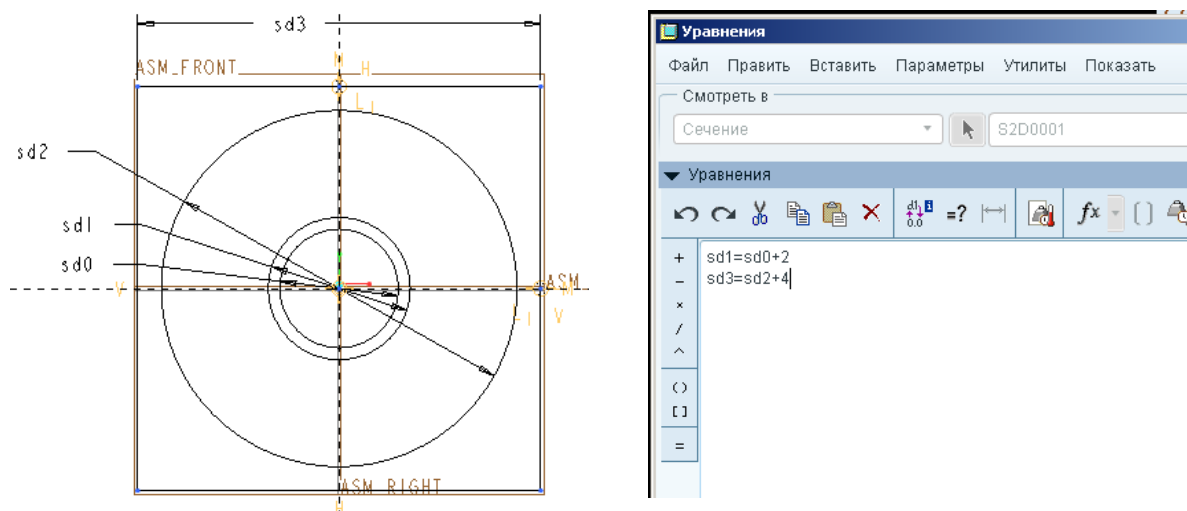


Рис. 5. Эскиз скелетона во фронтальной плоскости и уравнения параметров

На эскизе размер  $sd0$  соответствует диаметру якоря электромагнита, а  $sd1$  – минимальному диаметру обмотки электромагнита. Общим сопрягаемым размером является диаметр якоря –  $sd0$ , так как он будет определять и минимальный диаметр обмотки, и минимальный диаметр каркаса, на который будет нанесена эта обмотка. Предположим, что каркас мы изготовим

из диэлектрического материала, например карболита, допускающего получение толщины стенки в 1 мм. Поэтому в уравнениях связь этих двух диаметров описывается выражением  $sd1 = sd0 + 2$ . Это означает, что толщина каркаса при любых изменениях диаметра якоря будет оставаться равной 1 мм.

Аналогично эскиз 1 скелетона связывает и два других размера:  $sd3 = sd2 + 4$ . В этой формуле размер  $sd2$ , определяемый как максимальный диаметр обмотки электромагнита и как внутренний диаметр магнитопровода, устанавливает внешний размер квадратного корпуса  $sd3$ . Считаем, что толщины корпуса в самом тонком месте в 2 мм на сторону достаточно. Если бы наш корпус электромагнита был не квадратной, а круглой формы, то внешний диаметр его определился исходя из двух соображений: а – площадь поперечного сечения корпуса, выполняющего одновременно и функцию магнитопровода, должна быть не менее площади сечения якоря; б – толщина стенки корпуса должна обладать достаточной прочностью для защиты обмотки при возможных ударах или иных внешних механических воздействиях. Разумеется, вышеприведенные формулы очень просты и могут быть изменены в любое время в соответствии с изменившимися требованиями.

Оба определяющих размера  $sd0$  и  $sd2$ , в свою очередь, получатся из электротехнического расчета, так как зависят от сечения магнитопровода, диаметра провода обмотки, числа витков и т.д.

Второй эскиз скелетона (длины элементов) расположится в плоскости  $\square$  ASM\_RIGHT (рис. 6).

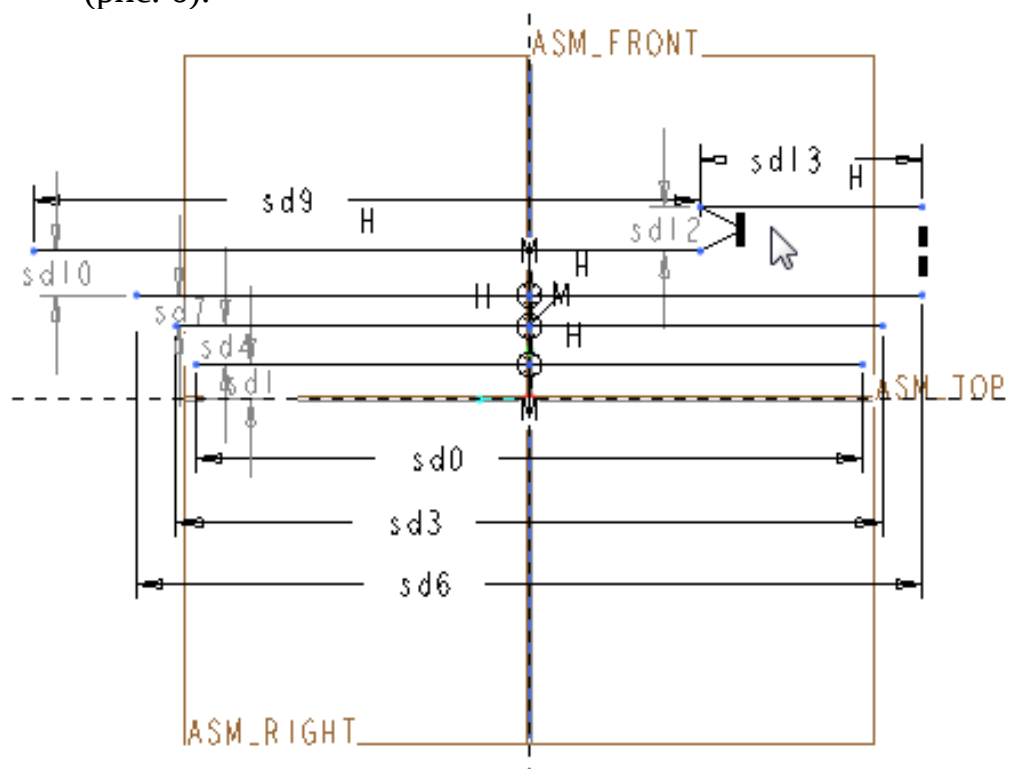


Рис. 6. Эскиз длин элементов скелетона модели

Взаимозависимость размеров также зададим уравнениями инструментов (рис. 7).

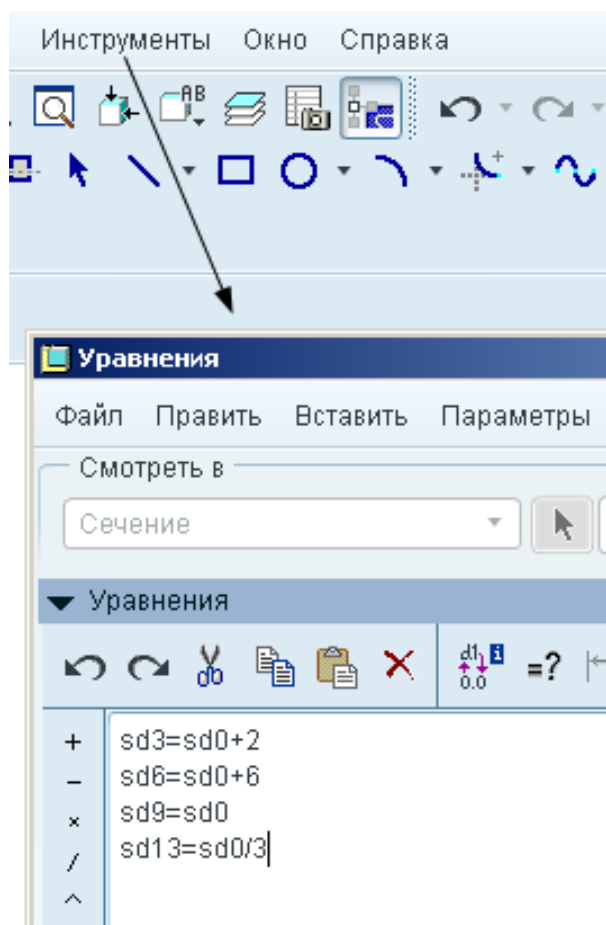


Рис. 7. Уравнения длин элементов электромагнита

Рассмотрим элементы второго эскиза. Как видно из формул, все размеры определяются в зависимости от размера  $sd0$ , т.е. длины обмотки электромагнита. Ясно, что размер  $sd3 = sd0 + 2$  есть не что иное, как максимальная длина каркаса обмотки, так как условились, что толщина стенки каркаса будет 1 мм. Размер  $sd6 = sd0 + 6$  соответствует максимальному размеру корпуса электромагнита, так как складывается из двух толщин переднего и заднего фланцев и двух толщин каркаса обмотки. Толщины фланцев для упрощения выбираем равными минимальной толщине корпуса, т.е. 2 мм. Для снижения намагничивающей силы паразитного воздушного немагнитного зазора в переднем фланце можно выполнить так называемый «воротничок». Увеличенная площадь «воротничка» позволяет магнитному потоку пройти паразитный зазор со значительно меньшей индукцией, чем в остальной части магнитопровода и, следовательно, с малой потерей намагничивающей силы обмотки.

Размер  $sd9$  – длину якоря – примем равной длине обмотки  $sd0$ , а длину стопа  $sd13$  – равной четыре девятых длины якоря  $sd0$ .



После создания эскизов в дереве модели появится соответствующая запись (рис. 8).

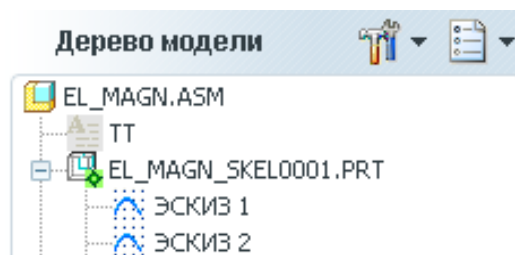



Рис.8. Дерево модели после эскизирования

Заканчивается создание скелетона объявлением общей геометрии, т.е. тех размеров скелета, которые будут общими для сопрягаемых частей электромагнита и снятия копий геометрии для каждой из деталей.

Необходимо снова обратиться к первому эскизу и, войдя в режим **вставить**, выбрать **совместные данные** и **общая геометрия**. Курсором указать на сопрягаемый элемент эскиза, выбрать **цепь один за одним** и нажать , объявив тем самым общую геометрию для данного элемента. Для примера на рис. 9 приведена цепь общей геометрии внешнего размера корпуса и внешнего размера обоих фланцев.

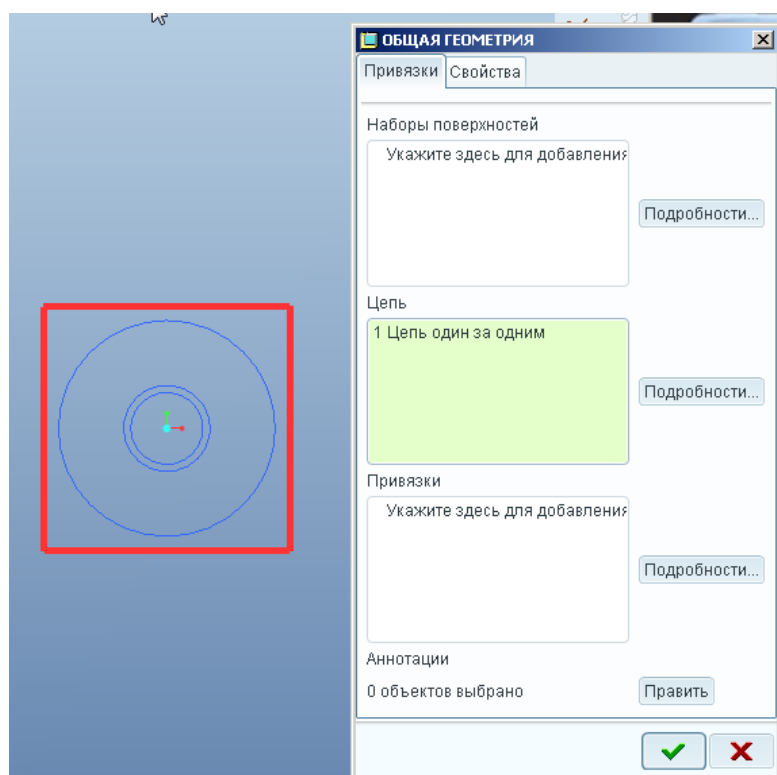


Рис. 9. Общая геометрия для внешнего размера электромагнита

Процедуру объявления общей геометрии необходимо сделать по числу общих сопрягаемых размеров этих двух эскизов, при этом в дереве модели появятся соответствующие записи (рис 10).

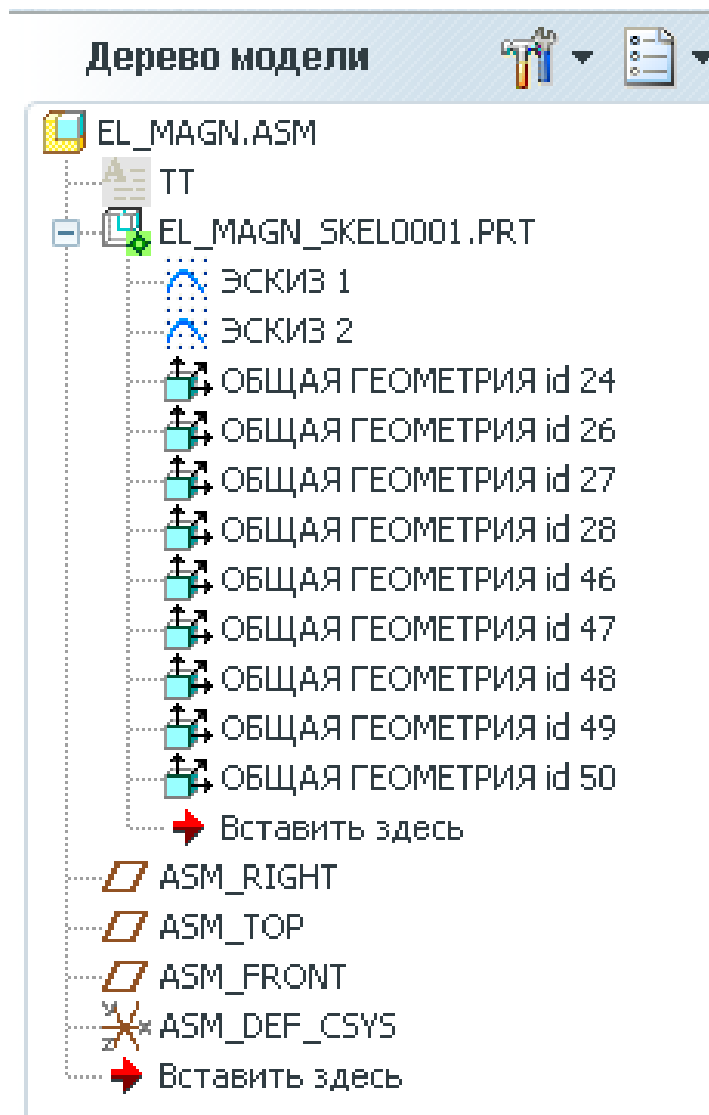


Рис. 10. Объявление общей геометрии скелетона

Как уже было показано на рис. 1, электромагнит состоит из шести твердотельных деталей: якоря (jakor), шпули (shpulia), корпуса (korpus), стопора (stopor), заднего фланца (zad\_flanez) и переднего фланца (per\_flanez). Создадим в дереве модели список из перечисленных шести деталей, используя процедуру



– создать компонент в режиме сборки, имя детали, ОК, пустой, ОК (рис. 11, а), затем в рамках активизированной каждой отдельной детали создадим копии геометрии (рис.11, б).

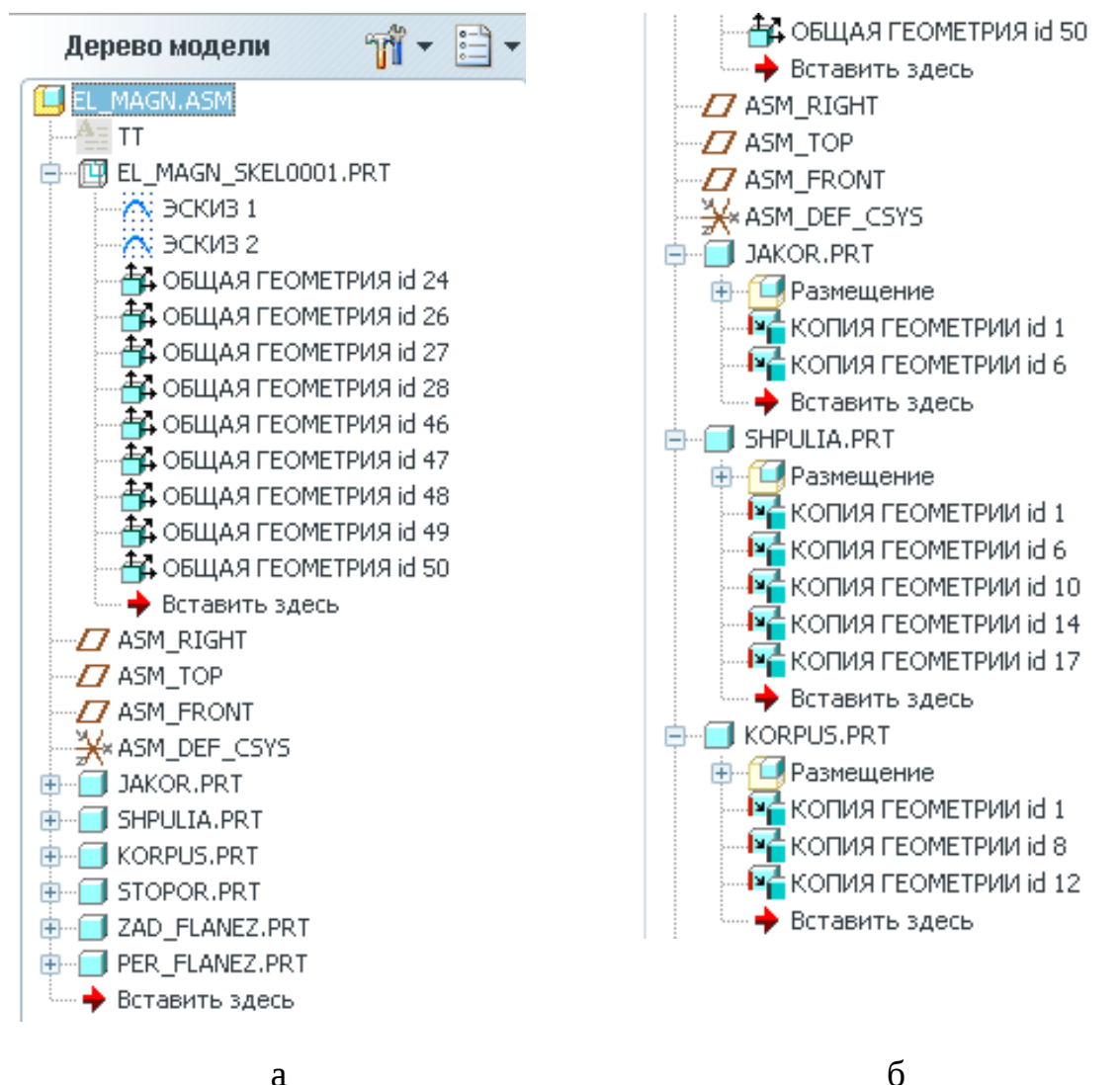



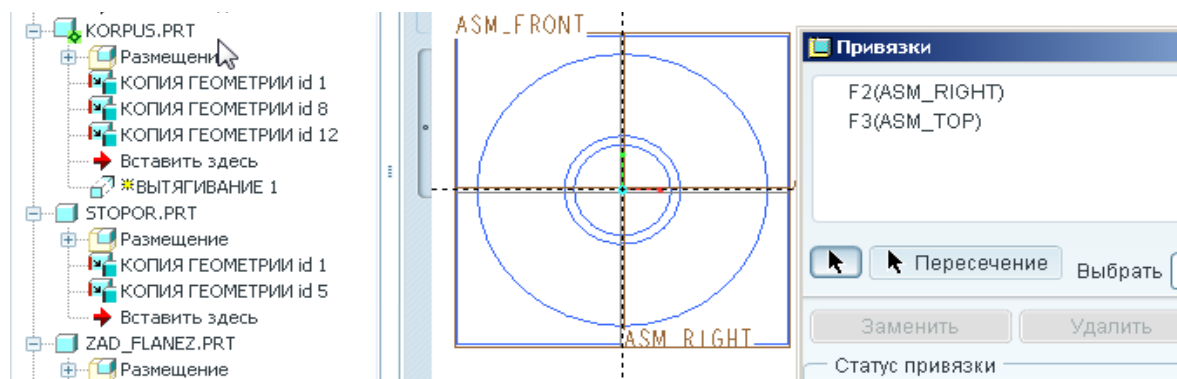
Рис. 11. Создание деталей и копий геометрии скелетона

Процедура создания копий следующая: **Активизирование детали, Вставить, Совместные данные, Копия геометрии**, курсором мыши указываем на очередной интересующий нас элемент скелетона, **нажимаем ЛКМ**, затем . На этом процедура создания скелетона с объявлением общей геометрии и копий геометрии деталей заканчивается, и можно переходить к созданию твердотельных деталей электромагнита.

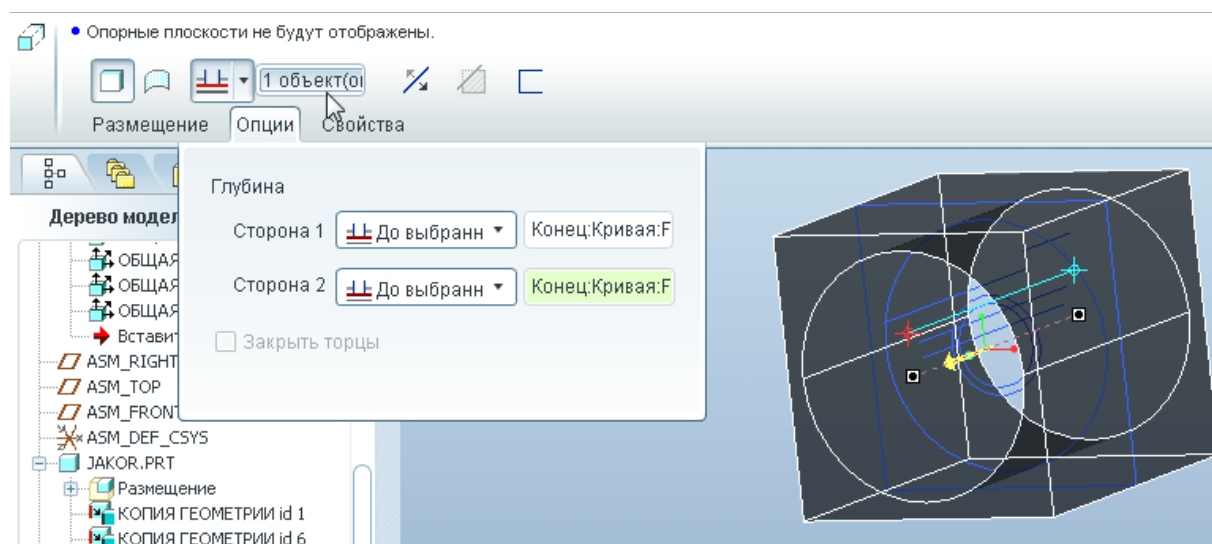
## Создание твердотельных деталей

Активизируя последовательно детали электромагнита, можно вести твердотельное проектирование каждой из них, опираясь на копии геометрических образов, записанных за каждой деталью.

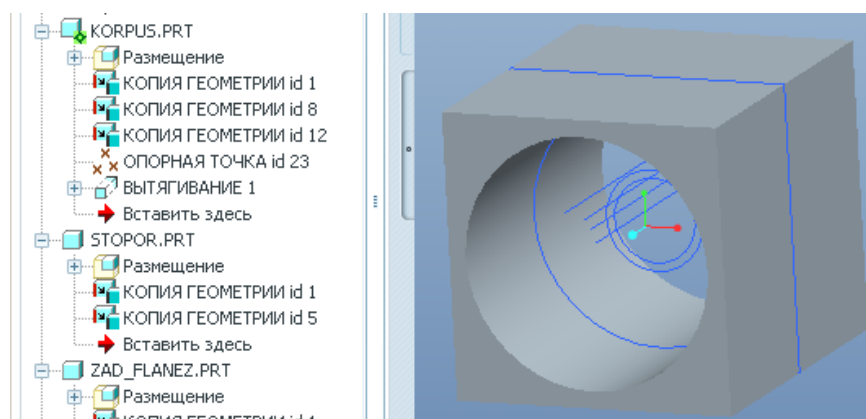
Для примера на рис. 12 показаны этапы создания корпуса электромагнита.



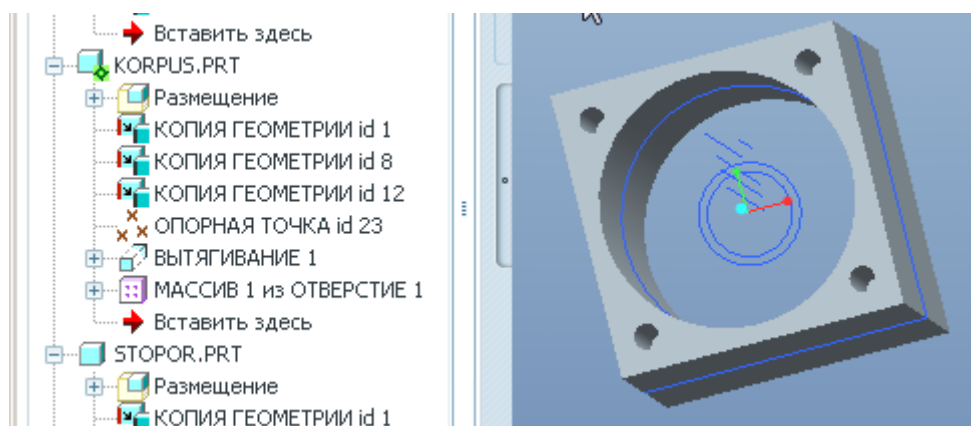
а



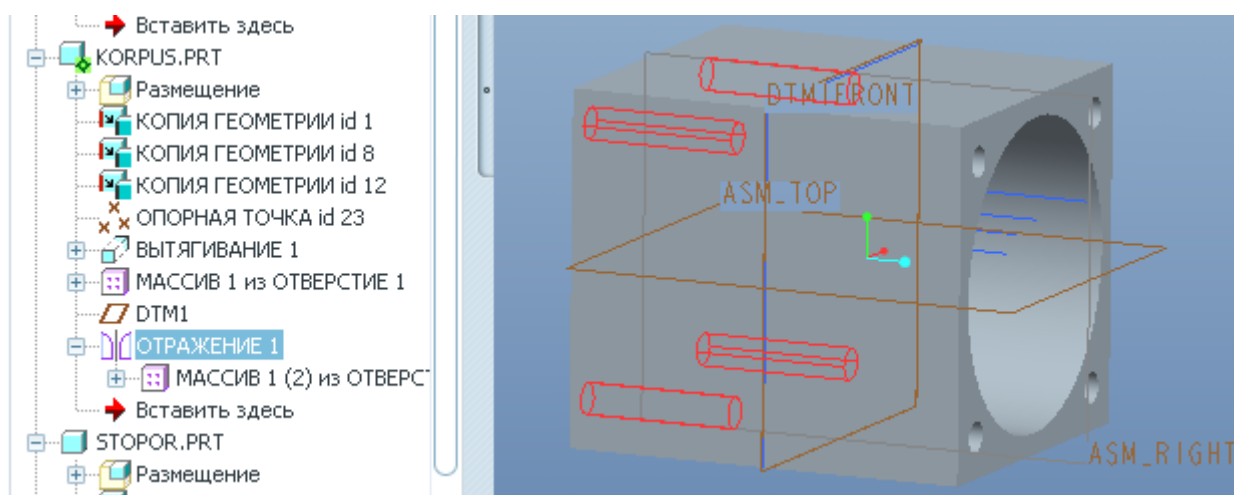
б



в



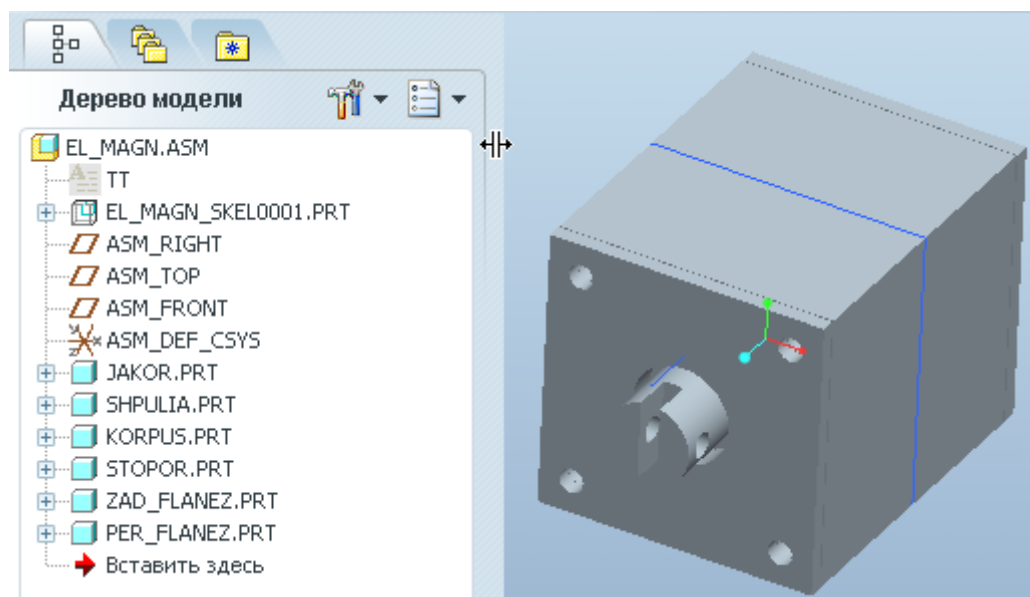
Г



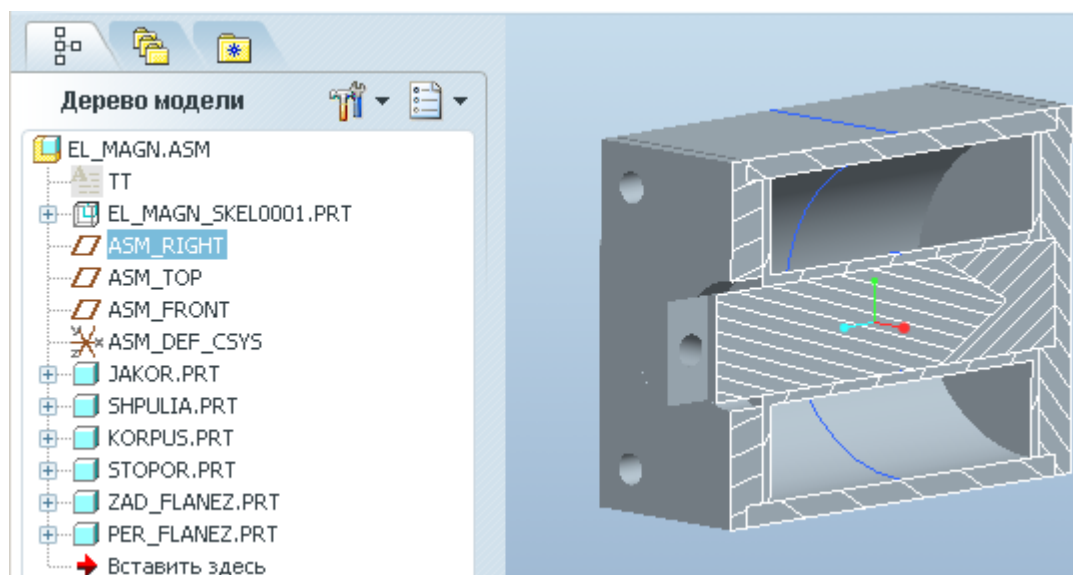
Д

Рис. 12. Процесс создания корпуса электромагнита:  
 а – назначение привязок в плоскости вытягивания;  
 б – назначение длины вытягивания  
 (выбрав опцию «до выбранной», указываем последовательно концы  
 элемента длины скелетона, отмеченные точками);  
 в – тело корпуса;  
 г – сверление массива отверстий крепления фланца к корпусу;  
 д – сверление массива отверстий с другой стороны корпуса  
 с использованием функции «отражение» и созданием плоскости  
 отражения DTM1

На рис. 13 представлен общий вид и разрез в плоскости ASM RIGHT готовой сборки.



а



б

Рис. 13. Дерево модели и общий вид электромагнита:

а – общий вид;

б – продольный разрез

## Интеграция с Mathcad

Начиная с 2006 г., пакет Mathcad приобретен фирмой РТС и интегрирован с пакетом Pro|ENGINEER для автоматизированного проектирования. Задав входные и выходные переменные модели, можно провести анализ и расчеты в среде Mathcad, результаты которых будут управлять скелетоном модели, а значит, и всей моделью в целом.

Зададимся конкретными значениями входных параметров будущего электромагнита, которые должны быть переданы в Mathcad:

$P=10$  – усилие электромагнита, Н;  
 $x=0,005$  – рабочий зазор (ход якоря), м;  
 $u=12$  – напряжение питания, В;  
 $B=0,5$  – индукция, Тл;  
 $\alpha=\pi/3$  – угол конуса якоря, рад;  
 $K_z=0,5$  – коэффициент заполнения окна медью;  
 $K_t=20$  – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности корпуса электромагнита, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  
 $K_p=1$  – коэффициент перегрузки;  
 $\Delta T = 50$  – допустимое превышение температуры корпуса электромагнита над температурой окружающей среды, °С.

Расчетные соотношения также разместим в программе вычислений, а из Mathcad получим:

а) параметры, управляющие размерами скелетона:

$d_j$  – диаметр якоря, м;  
 $d_{\max}$  – диаметр катушки максимальный, м;  
 $L_k$  – длина катушки, м;

б) электрические показатели:

$F$  – мдс катушки, А;  
 $d_m$  – диаметр провода (по меди), мм;  
 $W$  – число витков катушки;  
 $I$  – ток длительный, А;  
 $R$  – сопротивление катушки, Ом;  
 $N$  – мощность, выделяемая в обмотке, Вт;  
 $T_m$  – постоянная времени нагрева катушки, с;  
 $L$  – индуктивность катушки, Гн.

Ниже приводится алгоритм интеграции Pro|ENGINEER и Mathcad.

1. В программе Pro|Engineer объявляются все входные и выходные параметры, для чего открываем **Инструменты, Уравнения** и в закладке **Ло-**

**кальные параметры** указываем наименования и значения всех входных и только наименования всех выходных параметров (рис. 14).

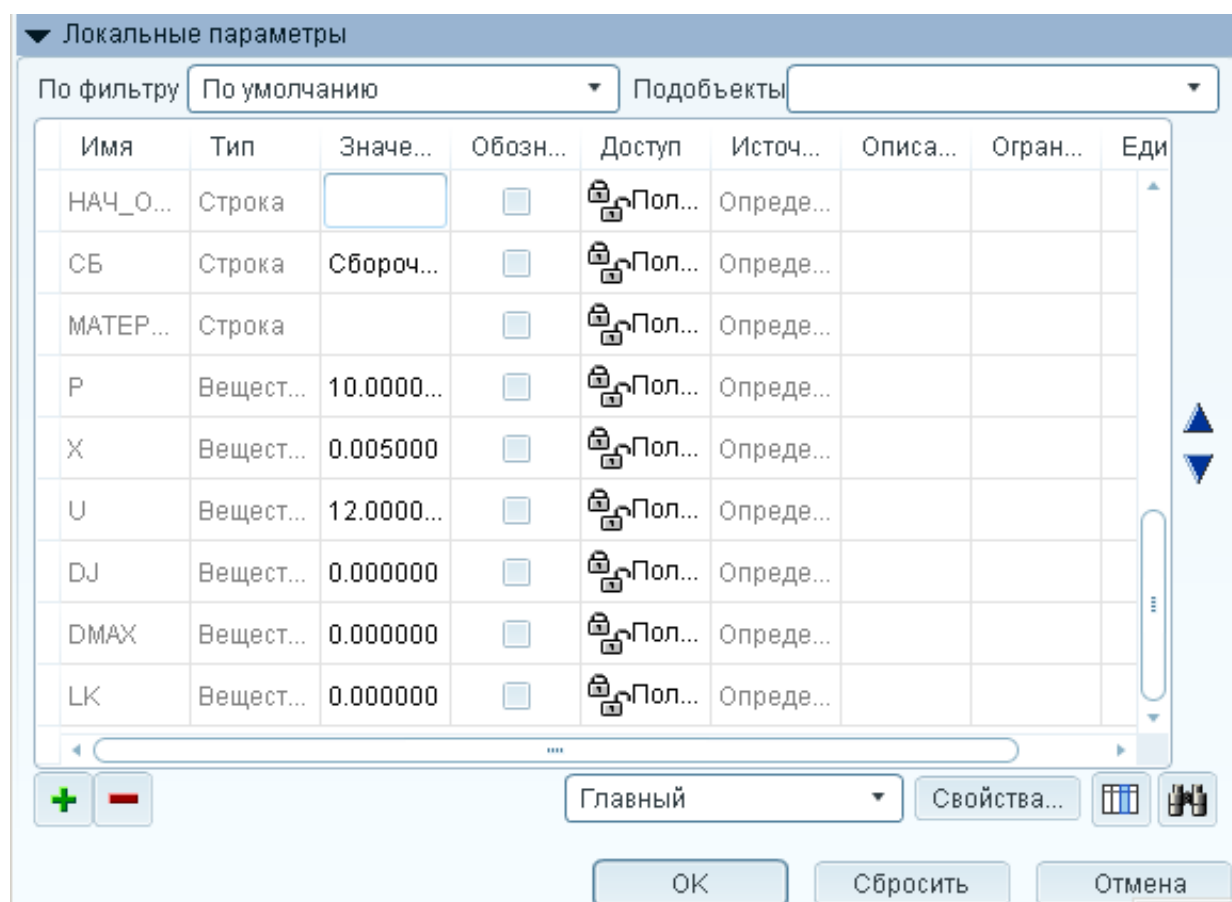



Рис. 14. Объявление входных: Р, Х, U и выходных: DJ, DMAX, LK параметров

2. Вставляем фичер анализа Mathcad:

**Вставить, Опорный элемент модели, Анализ**, отмечаем тип **Анализ MathCad, Следующий**. В дереве модели появляется фичер анализа MathCad

 **АНАЛИЗ id 579**. В появившейся закладке **Анализ MathCad** в разделе **Настройки** нажимаем **Новый файл**.

3. Создаем xmsd файл с входными\выходными переменными, для чего в появившемся окне программы Mathcad открываем новый файл и на «чистом листе» записываем величины входных параметров (рис. 15), константы (рис. 16), а также расчетные соотношения, формулы и пояснения (рис. 17). После нажатия клавиши **F9** начинается процесс расчета и его вывод на лист.



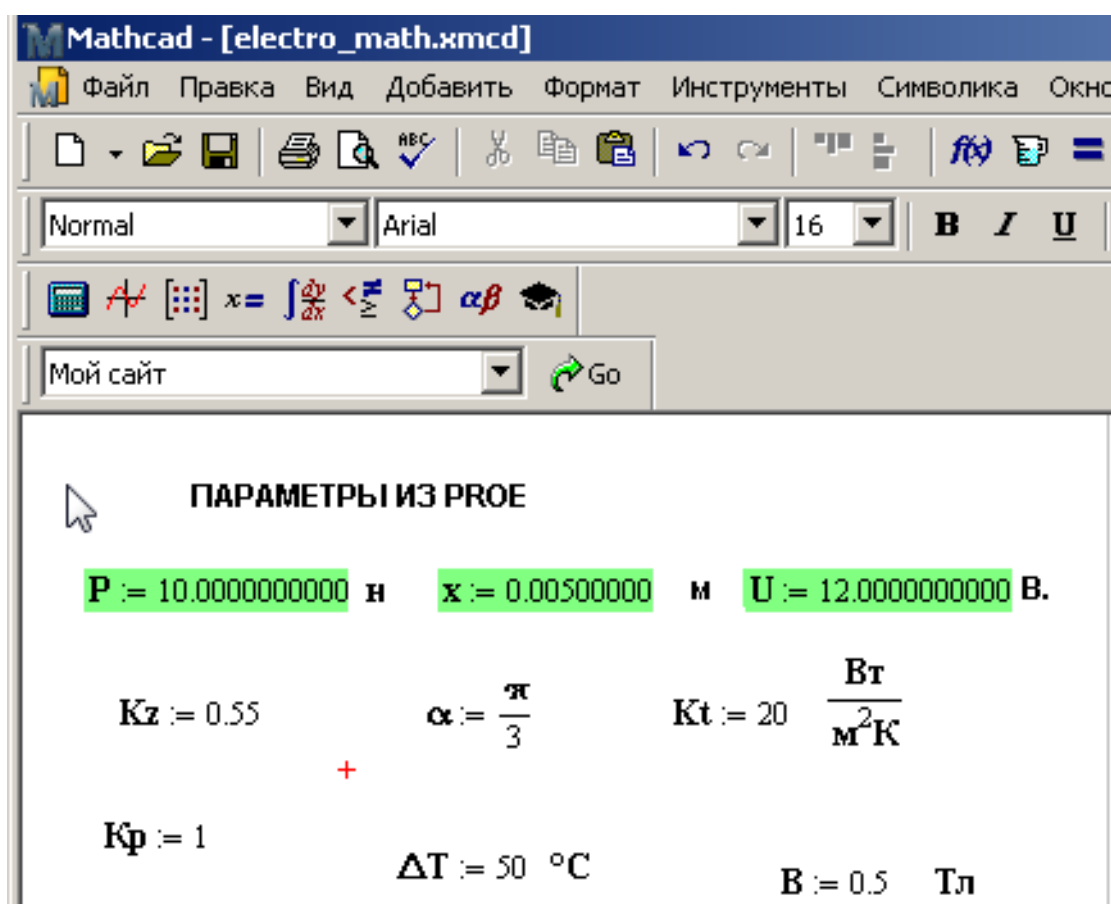


Рис. 15. Параметры, заносимые из Pro|ENGINEER в Mathcad

В верхней строке (отмечены зеленым цветом) основные входные параметры, далее параметры, взятые из справочников или априори.

### Константы

$$\begin{aligned}
 c &:= 390 \frac{\text{Дж}}{\text{кгК}} && \text{теплоемкость меди} \\
 \gamma &:= 8700 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} && \text{плотность меди} \\
 \mu &:= 4\pi 10^{-7} \frac{\text{Г}}{\text{м}} && \text{магнитная постоянная} \\
 \rho &:= \frac{1}{57} \text{ Ом мм}^2/\text{м} && \text{Удельное сопротивление меди при } 20^\circ \text{C}
 \end{aligned}$$

Рис.16. Константы (из справочников)

# РАСЧЕТ ГАБАРИТОВ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТА

$$d := \sqrt{\frac{P}{\pi 10^5 B^2}} \quad \text{диаметр якоря начальный} \quad \text{м}$$

$$dj := 1000 \cdot \text{round}(d, 3) \quad \text{диаметр якоря, округленный до третьего знака} \quad \text{dj} = 11 \quad \text{мм}$$

$$Sj := \pi \frac{(dj)^2 \cdot 10^{-6}}{4} \quad \text{площадь сечения якоря} \quad Sj = 9.503 \times 10^{-5} \quad \text{м}^2$$

$$dmax := 1000 \cdot \sqrt{P} \cdot 10^{-2} \quad \text{максимальный диаметр катушки} \quad \text{dmax} = 31.623 \quad \text{мм}$$

$$Fk := \sqrt{2P \frac{x^2}{\mu \cdot Sj} \cos(\alpha) \cos(\alpha)} \quad \text{мдс катушки} \quad Fk = 1.023 \times 10^3 \quad \text{А}$$

$$dcp := \frac{(dj + dmax)}{2} \quad \text{диаметр среднего витка катушки} \quad dcp = 21.311 \quad \text{мм}$$

$$dm := \sqrt{4 \cdot 10^{-3} \rho dcp \frac{Fk}{U}} \quad \text{диаметр провода без изоляции} \quad dm = 0.357 \quad \text{мм}$$

$$I := 0.75 \pi (dm)^2 \quad \text{ток катушки при длительном включении} \quad I = 0.3 \quad \text{А}$$

$$Rk := \frac{U}{I} \quad \text{сопротивление катушки} \quad Rk = 39.943 \quad \text{Ом}$$

$$w := \frac{Fk \cdot Rk}{U} \quad \text{число витков катушки} \quad w = 3.405 \times 10^3$$

$$Nk := I \cdot U \quad \text{мощность} \quad Nk = 3.605 \quad \text{Вт}$$

$$Qk := \frac{w \pi (dm)^2}{4Kz} \quad \text{Площадь окна под обмотку} \quad Qk = 620.053 \quad \text{мм}^2$$

$$Hk := dcp - dj \quad \text{высота окна обмотки} \quad Hk = 10.311 \quad \text{мм}$$

$$Lk := \frac{Qk}{Hk} \quad \text{длина катушки} \quad \text{Lk} = 60.133 \quad \text{мм}$$

$$mk := \frac{(dm)^2 w \cdot dcp \pi^2 10^{-6} \cdot \gamma}{4} \quad \text{масса провода катушки} \quad mk = 198.642 \quad \text{г}$$

Рис. 17. Расчетные соотношения и результаты расчетов  
(красным цветом отмечены три основные выходные параметра)

После создания расчетного файла **Mathcad - [эл.\_магн.xmcd]**, проверки на расчет и корректировки его необходимо сохранить, например, в «Моих документах».

Снова возвращаемся в отложенный анализ программы Pro|ENGINEER и вызываем только что созданный расчетный файл **Mathcad - [эл.\_магн.xmcd]** нажатием **Загрузить файл...**, после чего можно приступить к загрузке параметров в разделе из Прое в Mathcad нажатием **Добавить параметр** (рис. 18).

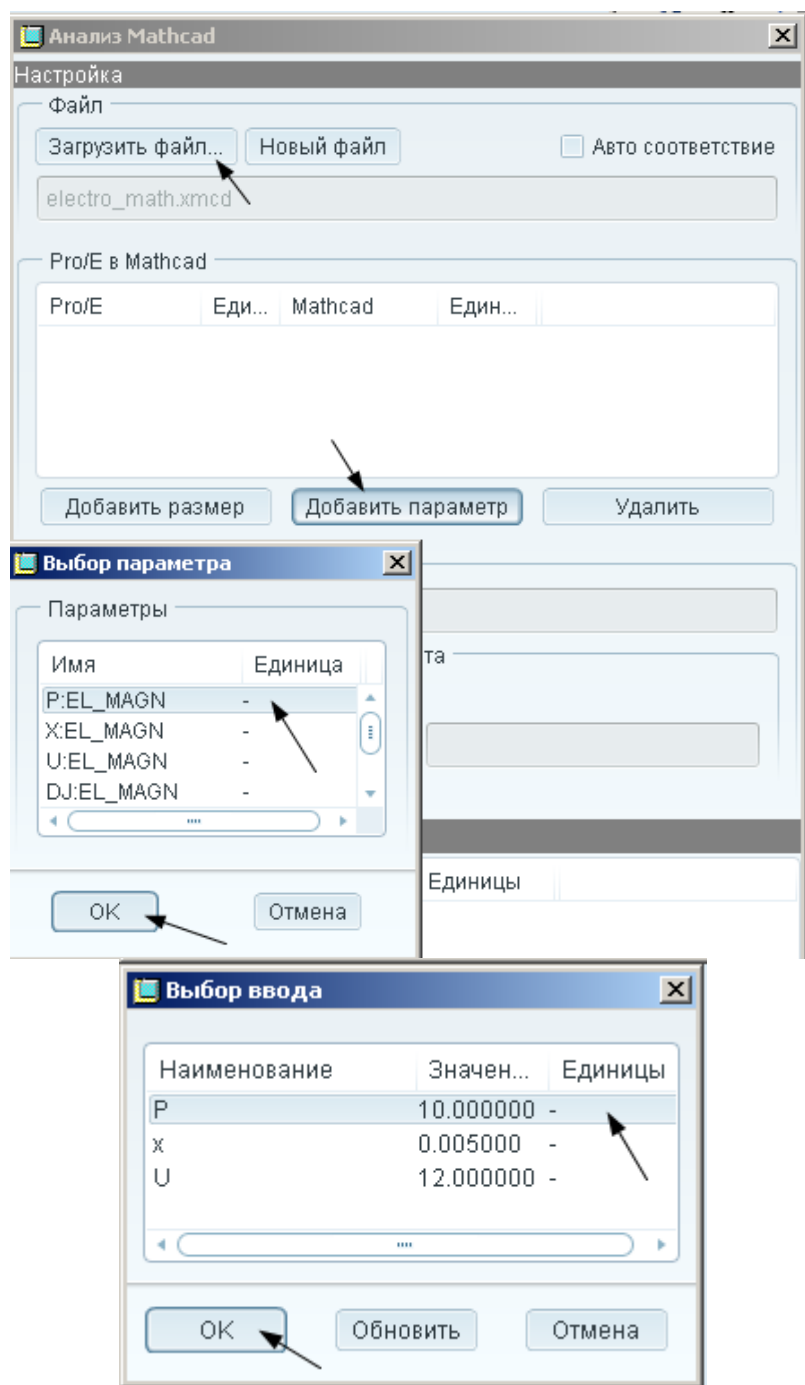

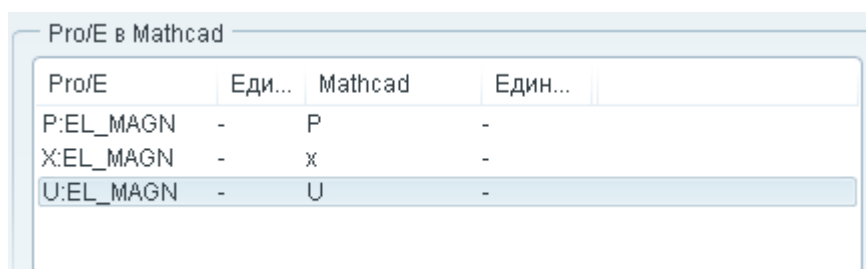


Рис. 18. Процедура загрузки расчетного файла и параметров из Pro/E в Mathcad

Тем самым мы связываем параметры, которые мы объявили в нашей сборке и параметры, объявленные в Mathcad.

В появившейся закладке **Выбор ввода** видно, что из шести параметров осталось только три – P, X и U, так как Mathcad из всего списка файла  electro\_math.xmcd отобрал лишь те, у которых префикс proe2mc. Указываем на тот же самый одноименный параметр и подтверждаем **OK**, после чего этот параметр займет свою строку в разделе из **Pro/E в Mathcad** (тег proe2mc) таблицы **Анализа**. Это те параметры, которые от имени каркасной модели будут связаны с Mathcad. После занесения всех входных параметров этот раздел таблицы примет вид рис. 19, а параметры из сборки будут связаны с параметрами вычислений в Mathcad.



Pro/E	Еди...	Mathcad	Един...
P:EL_MAGN	-	P	-
X:EL_MAGN	-	x	-
U:EL_MAGN	-	U	-

Рис. 19. Входные параметры из Pro/E в Mathcad

Аналогично занесем и выходные параметры. Последовательно нажимаем **Выводы** и в выпадающем окне отмечаем галочками все выходные параметры dj, dmax и Lk (рис. 20).

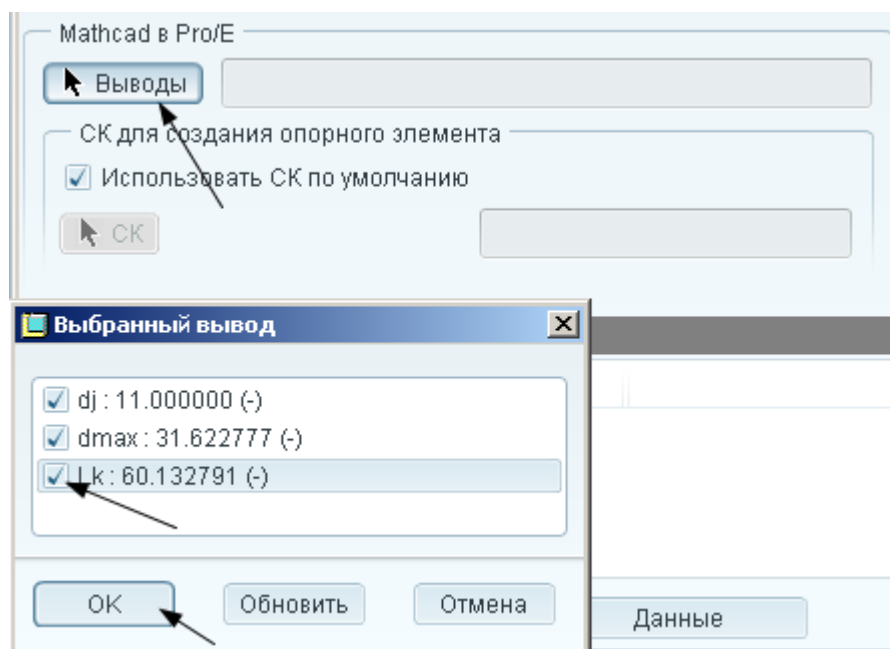



Рис. 20. Вывод выходных параметров

При нажатия **OK** происходит считывание файлов  electro\_math.xmcd на предмет поиска тегов mc2proe (из Mathcad в Pro/E), а после нажатия

**Вычислить** в разделе **Результаты** появятся значения найденных выходных геометрических параметров, после чего это окно можно **Заккрыть** (рис. 21).

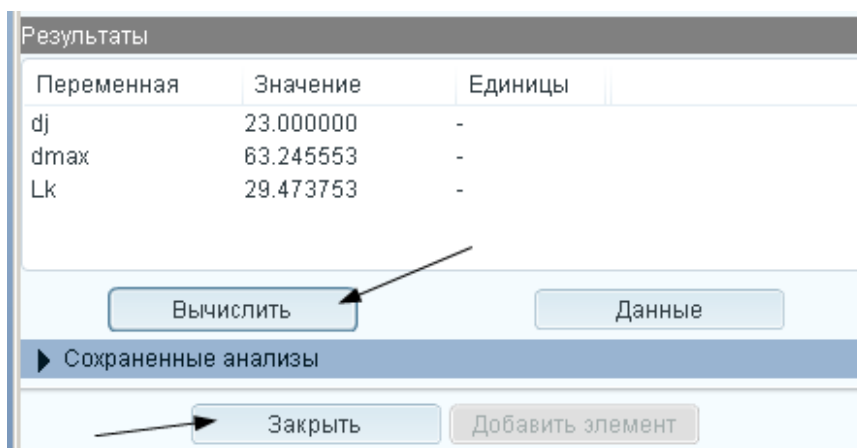


Рис. 21. Результаты вычислений в таблице Анализа

В процессе закрытия в параметрах результатов появляется аббревиатура МС, что свидетельствует об успешном выполнении вычислений и присвоении им промежуточных аналогичных значений, но с префиксом МС (рис. 22).

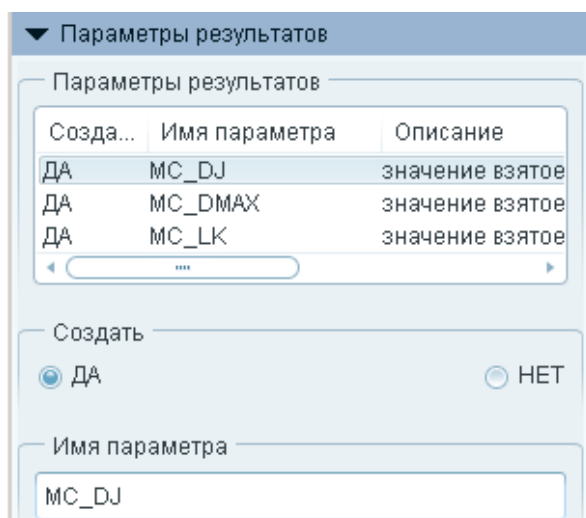



Рис. 22. Параметры результатов

В дереве модели появляется фичер  ANALYSIS1, который связывает программы Pro|Engineer и Matcad.

4. Проведем увязывание входных и выходных геометрических параметров, для чего определяем в **"Уравнениях" Инструментов** необходимые равенства для входных и выходных параметров по правилам:

- присвоение идет справа налево;
- при извлечении переменных из анализа пишем:

"имя\_параметра:FID\_" + "имя\_фичера\_анализа", тем самым управляющий размер приравнивается к управляемому параметру геометрической модели.

Для правильного согласования необходимо присвоить геометрическим размерам модели те значения, которые мы нашли в Mathcad, для чего вызываем *Эскиз 1* и *Эскиз 2* из дерева модели и, указывая курсором на интересующий нас размер, переносим его в уравнения (рис. 23).

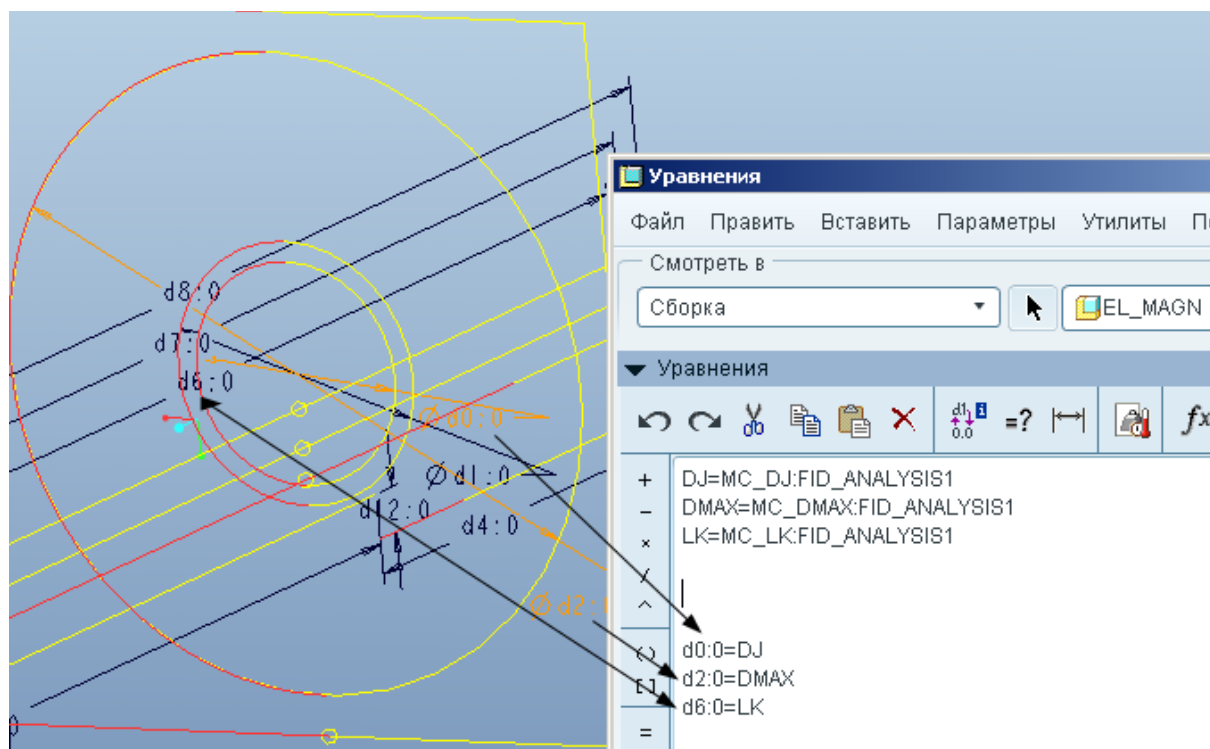


Рис. 23. Согласование входных и выходных параметров

На этом процедура интеграции этих двух программ заканчивается, нажимаем **ОК** и запускаем процесс регенерации модели (два раза).

## Регенерация модели

Весь довольно трудоемкий процесс создания скелетона модели и увязки процедуры обмена параметрами двух программ с лихвой окупается с наступлением момента использования нашего труда, когда мы можем насладиться теми возможностями, которые нам предоставляет САПР.

Управлять процессом создания электромагнита можно, непосредственно вмешиваясь (корректируя) в эскизы скелетона, его расчетные соотношения в уравнениях или дереве построения твердотельных деталей. Конечно, входные параметры, не участвующие в геометрических эскизах скелетона  $P$ ,  $X$  и  $U$ , также становятся управляемыми по нашему желанию. На рис. 24 показана процедура задания новых значений входных параметров  $P = 20$  Н,  $X = 0.01$  м,  $U = 24$  В. Введем новые значения в локальные параметры уравнений, после чего нажимаем **ОК** и запускаем процесс регенерации.

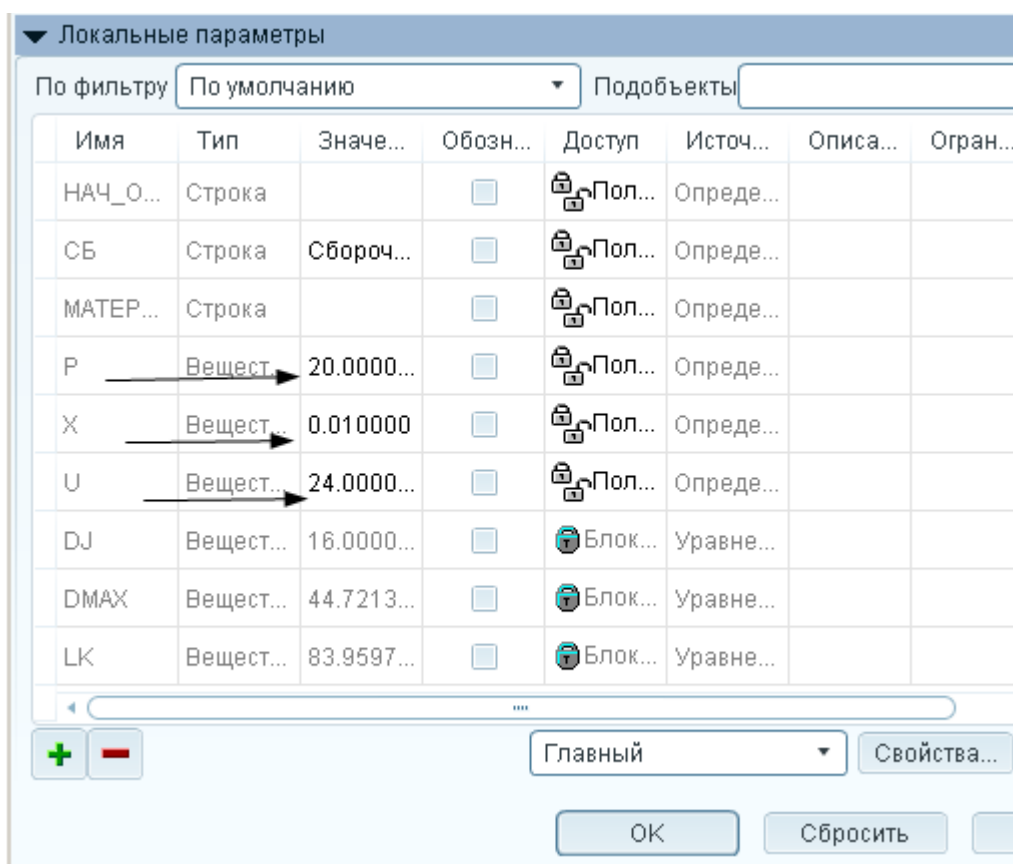


Рис. 24. Внесение новых входных параметров

Сравнение рис. 24 и рис. 20 показывает, что произошло перестроение модели с выявлением новых выходных параметров. Как видно, диаметр якоря увеличился с 11 до 16 мм, максимальный диаметр катушки – с 31,6 до 44,7 мм, а длина – с 60,1 до 83,9 мм. Соответственно этим размерам произошло перестроение модели от скелетона до всех твердотельных деталей, в чем можно убедиться, если сравнить первоначальные (а) и вновь вычисленные (б) размеры эскиза 1 скелетона модели (рис. 25).

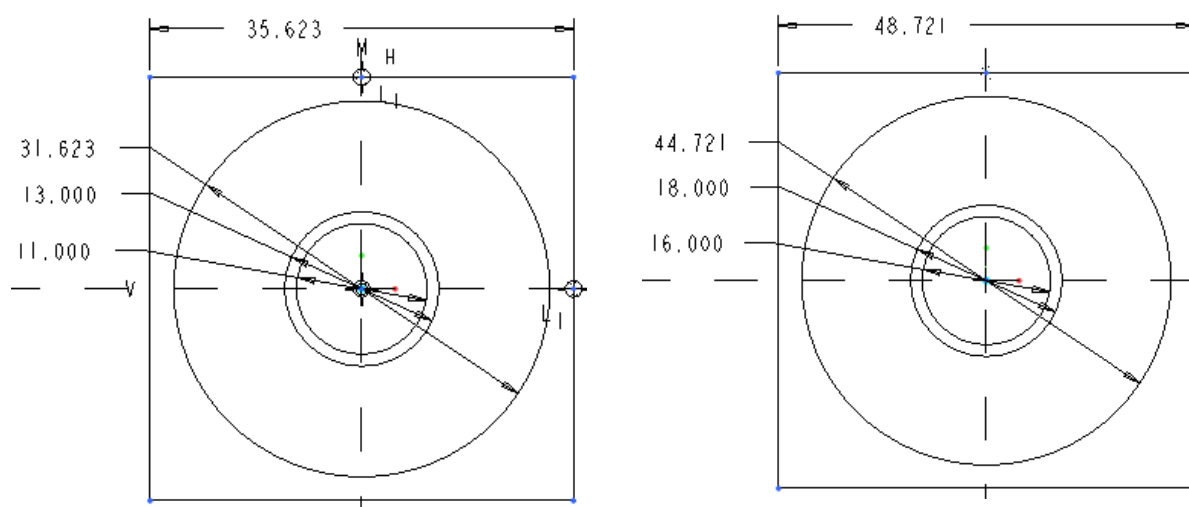



Рис. 25. Эскиз 1 скелетона: а – первоначальный, б – измененный

Если открыть страничку файла Mathcad  electro\_math.xmcd , то можно убедиться в том, что произошел пересчет параметров электромагнита (в том числе и электрических), рис. 26.

#### РАСЧЕТ ГАБАРИТОВ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТА

$$\begin{aligned}
 d &:= \sqrt{\frac{P}{\pi 10^5 B^2}} && \text{диаметр якоря начальный} && \text{м} \\
 d_j &:= 1000 \cdot \text{round}(d, 3) && \text{диаметр якоря, округленный до третьего знака} && d_j = 16 \text{ мм} \\
 S_j &:= \pi \frac{(d_j)^2 \cdot 10^{-6}}{4} && \text{площадь сечения якоря} && S_j = 2.011 \times 10^{-4} \text{ м}^2 \\
 d_{\max} &:= 1000 \cdot \sqrt{P} \cdot 10^{-2} && \text{максимальный диаметр катушки} && d_{\max} = 44.721 \text{ мм} \\
 F_k &:= \sqrt{2P \frac{x}{\mu \cdot S_j} \cos(\alpha) \cos(\alpha)} && \text{мдс катушки} && F_k = 1.989 \times 10^3 \text{ А} \\
 d_{cp} &:= \frac{(d_j + d_{\max})}{2} && \text{диаметр среднего витка катушки} && d_{cp} = 30.361 \text{ мм} \\
 d_m &:= \sqrt{4 \cdot 10^{-3} \rho d_{cp} \frac{F_k}{U}} && \text{диаметр провода без изоляции} && d_m = 0.42 \text{ мм} \\
 I &:= 0.75 \pi (d_m)^2 && \text{ток катушки при длительном включении} && I = 0.416 \text{ А} \\
 R_k &:= \frac{U}{I} && \text{сопротивление катушки} && R_k = 57.675 \text{ Ом} \\
 w &:= \frac{F_k \cdot R_k}{U} && \text{число витков катушки} && w = 4.781 \times 10^3 \\
 N_k &:= I \cdot U && \text{мощность} && N_k = 9.987 \text{ Вт} \\
 Q_k &:= \frac{w \pi (d_m)^2}{4 K_z} && \text{Площадь окна под обмотку} && Q_k = 1.206 \times 10^3 \text{ мм}^2 \\
 H_k &:= d_{cp} - d_j && \text{высота окна обмотки} && H_k = 14.361 \text{ мм} \\
 L_k &:= \frac{Q_k}{H_k} && \text{длина катушки} && L_k = 83.96 \text{ мм} \\
 m_k &:= \frac{(d_m)^2 w d_{cp} \pi^2 10^{-6} \cdot \gamma}{4} && \text{масса провода катушки} && m_k = 550.287 \text{ г}
 \end{aligned}$$

Рис. 26. Параметры электромагнита с новыми входными данными



Анализ диаметра якоря показывает, что и в сборочной модели произошли изменения (рис. 27).

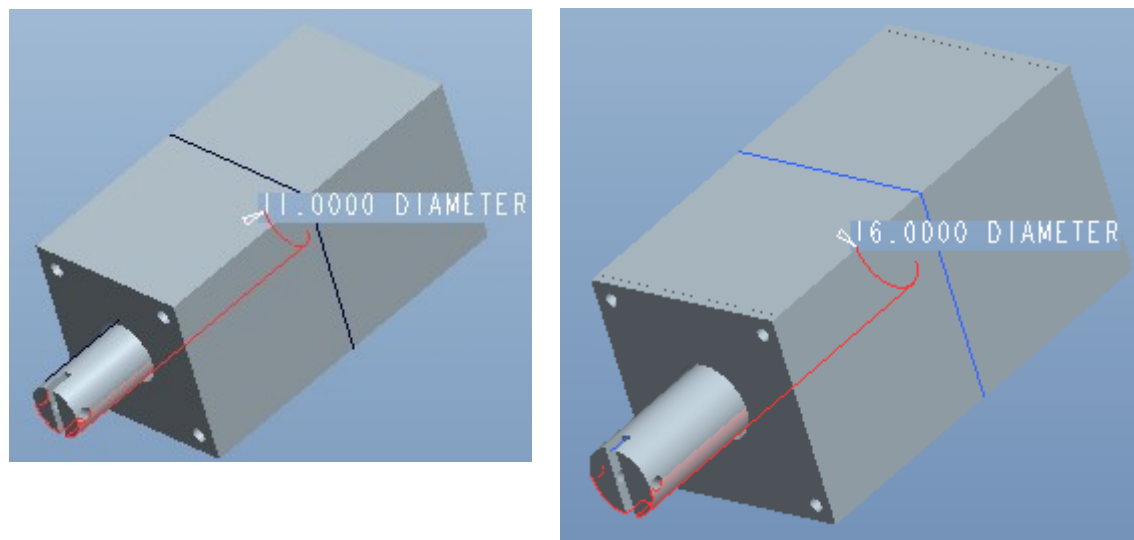


Рис. 27. Контроль диаметра якоря после регенерации